

Teoría de restricciones (TOC) como metodología dinámica de mejora continua en líneas de producción automotrices  
Theory of restrictions (TOC) as a dynamic methodology of continuous improvement in automotive production lines.

J. Salinas-Rodríguez <sup>a,\*</sup>, J.A. Romero-Guerrero <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Posgrado CIATEQ, A.C. Circuito Aguascalientes Norte # 135, Parque Industrial del Valle de Aguascalientes San Francisco de los Romo, 20358, Aguascalientes, México.

<sup>b</sup> Departamento Manufactura Virtual y Lean y Cad Cae, CIATEQ A. C., Gaza 30 lote 1 Distrito de Educación, Salud, Ciencia, Tecnología e Innovación, 42163 San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México.

## Resumen

La industria automotriz durante décadas ha mostrado que es el modelo para seguir la mejora continua, y bajo esa premisa ha hecho uso de innumerables técnicas que permitan el incremento de productividad, el incremento en la efectividad de tiempos para satisfacer el requerimiento de los clientes, la eficiencia en la cadena de suministro, la optimización de aquellos procesos con mayor tiempo de proceso. El propósito de esta investigación es hacer uso y aplicación de la metodología de teoría de restricciones (TOC) en conjunto con la efectividad global del equipo (OEE) para mantener un ciclo de mejora continua dentro de las líneas de producción de sensores automotrices.

*Palabras Clave:* Teoría de restricciones (TOC), tiempo de ciclo, productividad, OEE, pérdidas de velocidad, entrenamiento.

## Abstract

The automotive industry for decades has shown that it is the model to follow the continuous improvement, and under this premise it has made use of innumerable techniques that allow the increase of productivity, the increase in the effectiveness of times to satisfy the requirement of the clients, the efficiency in the supply chain, the optimization of those processes with the longest processing time. The purpose of this research is to make use and application of the theory of restrictions (TOC) methodology in conjunction with the overall effectiveness of the equipment (OEE) will give us the benefit of maintaining a cycle of continuous improvement within the automotive sensor production lines.

*Keywords:* Theory of restrictions (TOC), cycle time, productivity, OEE, speed loss, training.

## 1. Introducción

La industria automotriz es considerada un sector estratégico para la actividad económica por el dinamismo que imprime tanto a la manufactura como a muchas otras actividades productivas de las zonas donde se ubica. Por ello, ha sido materia de análisis en un considerable número de trabajos tanto a nivel internacional como nacional (Carbajal Suarez, 2016).

En las últimas décadas el estado de Aguascalientes ha tenido un desarrollo importante al insertarse como eslabón en el proceso de producción económica mundial, a partir de un proceso de industrialización que lo sitúa entre las primeras cinco entidades con mayor crecimiento económico en las

últimas décadas. No obstante, este crecimiento ha tenido altas y bajas, que han dependido del apoyo y los planteamientos hacia la industrialización de diferentes regímenes de gobierno, por lo que es necesario plantear políticas públicas de largo plazo que apoyen en forma decidida y permanente el proceso de industrialización (López Garcia, 2017).

Los avances sólo se han presentado en los sectores industriales en donde se ubican empresas multinacionales de los sectores automotriz, electrónico y eléctrico, pero es importante encontrar también un enfoque que integre a las empresas locales en las redes productivas de las empresas multinacionales que lideran el proceso de industrialización, de esta manera se fomenta la producción de las empresas locales,

\*Autor para la correspondencia: jacob.salinas.r@gmail.com

Correo electrónico: jacob.salinas.r@gmail.com (Jacob Salinas-Rodríguez), adan.romero@ciateq.mx (Jorge Adan Romero-Guerrero).

posibilitando una mayor flexibilidad de las empresas multinacionales para integrar a las empresas locales en sus redes productivas, y así enfrentar de manera conjunta el proceso de globalización (López García, 2017).

La empresa donde se implementó esta metodología está enfocada al sector de sensores y controles global en donde el principal objetivo es satisfacer las necesidades del mercado automotriz y del sector industrial, en donde la alta demanda y competitividad han llevado a la empresa a integrarse al camino de la mejora continua.

## 2. Antecedentes

“Los sistemas modernos de producción se caracterizan por un corto tiempo de vida de producto, un alto nivel de automatización, una nueva manufactura emergente en equipo y tecnología y una alta inversión” (Dolgui, 2017).

El cumplimiento hacia el lanzamiento de nuevos productos con una alta eficiencia y bajo costo es un punto en que las empresas se ven sobrepasadas ya que durante el análisis o concepción del mismo proyecto ciertas operaciones o tareas son minimizadas y relegadas de su punto principal, mantener un balance entre funcionalidad y producción.

La empresa objeto de este estudio no es la excepción, una de las principales características con las que cuentan las líneas de producción es que los equipos considerados como cuello de botella son los equipos con un mayor nivel de inversión, y dependiendo de las características del proceso hay ciertas líneas en las que cambia la restricción, debido a la combinación de capacidad del equipo mismo, complejidad del proceso, capacitación del personal de producción y las características del producto mismo en donde se puede originar un alto nivel de desperdicio de sensores automotrices esto en algunas veces inherente al diseño del producto.

Actualmente la empresa cuenta con una amplia gama de productos para todos los sectores de sensores y controles, para fines prácticos de estudio se mencionará en particular el sector de sensores de presión automotriz (APT-Auto), estas unidades de negocios cuentan con 18 líneas de producción o celdas las cuales han crecido gradualmente de acuerdo al requerimiento de producción en alrededor de 15 años, estas líneas de producción esta divididas en 4 segmentos que abarcan los principales sectores automotrices en términos de sensores de presión de aceite, sensores de gasolina, sensores para frenos, sensores de aplicaciones de transmisiones y sensores de aire acondicionado.

Otro punto importante para considerar es que la configuración con la que cuentan las líneas no es necesariamente la correcta o la que ofrece una mejor funcionalidad, sino a medida que las líneas de producción crecían llego un momento en que ya el espacio no era suficiente para poder mantener un esquema tradicional o realizar el mejor acomodo que permitirá un flujo continuo entre las operaciones subsecuentes.

Como toda empresa automotriz la capacidad de una celda es muy importante ya que esto define el tiempo de respuesta para satisfacer la demanda del cliente, es por ello, que año con

año se realiza un estudio de esta capacidad para determinar que celda potencialmente podría generar un problema de entregas debido a esta diferencia de capacidad vs demanda de cliente.

Servicio al cliente es el departamento que provee la demanda a futuro del cliente al departamento de planeación de producción que conjuntamente y con el soporte del departamento de producción puedan analizar y entender cuál es la situación de cada una de las líneas de producción por mes, por cuatrimestre, por semestre o hasta por un año de producción.

Al realizar esta comparación se puede obtener una diferencia entre capacidad y demanda, la diferencia de este resultado ya en términos porcentuales se define como la capacidad adicional a la demanda o porcentaje de Buffer que se muestra en la tabla 1, las celdas en identificadas en color amarillo muestran que se encuentran en peligro de no cumplir el requerimiento del cliente y en rojo la celda que no cumplirá el requerimiento de cliente y por ende se puede traducir como una baja productividad en términos porcentuales y una significativa pérdida en términos de ventas para la empresa.

Tabla 1: Análisis de capacidad por celda por cuarto. Elaboración propia

Cell	Buffer%	Q1-2021	Q2-2021	Q3-2021	Q4-2021	FY
C01M	Buffer Capa%	5%	12%	-3%	16%	7%
C02M	Buffer Capa%	-7%	14%	-3%	1%	1%
C03M	Buffer Capa%	26%	16%	11%	27%	20%
C04M	Buffer Capa%	46%	57%	96%	56%	64%
C05M	Buffer Capa%	38%	23%	34%	51%	36%
C07M	Buffer Capa%	-3%	24%	37%	71%	32%
C20M	Buffer Capa%	-3%	-8%	12%	41%	11%
C06M	Buffer Capa%	51%	47%	37%	61%	49%
C08M	Buffer Capa%	56%	61%	63%	75%	64%
C11M	Buffer Capa%	19%	13%	14%	30%	19%
C12M	Buffer Capa%	32%	22%	22%	46%	30%
C14M	Buffer Capa%	38%	23%	38%	42%	36%
C15M	Buffer Capa%	31%	34%	55%	59%	45%
C19M	Buffer Capa%	-13%	-18%	2%	14%	-3%
C16M	Buffer Capa%	14%	1%	27%	34%	19%
C17M	Buffer Capa%	29%	6%	16%	26%	19%
C18M	Buffer Capa%	-4%	13%	2%	31%	10%
C21M	Buffer Capa%	-14%	34%	34%	31%	21%
Total	Buffer Capa%	17%	19%	24%	39%	25%

## 3. Marco Teórico

### 3.1. Teoría de Restricciones (TOC)

En la búsqueda de herramientas para mejorar los procesos de producción desde su planificación, el Dr. Eliyahu Goldratt a principios de los 80's, empezó el desarrollo de una nueva filosofía de gestión llamada “Teoría de Restricciones” (TOC por sus siglas en inglés: *Theory of Constraints*), que buscaba ser solución al problema de optimización de la producción Goldratt y Cox (1988).

Esta teoría plantea un proceso de mejora continua y su premisa básica establece que la salida del sistema está determinada por sus restricciones, teniendo una aplicación más amplia que la planeación y control de la producción (Mateus, 2016).

TOC ve a cualquier empresa como un sistema, es decir, como un conjunto de elementos en una relación

interdependiente y el desempeño global del sistema depende de la interacción de todos los elementos del sistema, como también su continua interacción con el ambiente (Vanegas, 2012).

TOC asume que cada sistema está limitado al menos por una restricción o cuello de botella, que afecta el desempeño de esta, debido a que es quien determina su capacidad. En ese sentido, para adquirir un mayor nivel operativo en relación su objetivo, es necesario mejorar el manejo de la restricción y/o elevar su capacidad permitiendo direccionar la empresa o línea de producción hacia la consecución de mayores y mejores resultados de manera lógica y sistemática (Vanegas, 2012).

TOC representa un cambio de paradigma, una manera diferente de pensar sobre los problemas, metas, objetivos y comportamientos, mediante el uso de procesos de pensamientos y diagramas lógicos que permiten optimizar y adecuar distintas herramientas técnicas y de gestión para ser usadas por las organizaciones, con una alta probabilidad de conseguir excelentes resultados (Vanegas, 2012).

La existencia de restricciones representa oportunidades de mejora, se ve las restricciones como algo positivo en lugar de verlo de manera negativa. Debido a que las restricciones determinan el desempeño de un sistema, una elevación gradual (mejora) de las restricciones mejorara el desempeño de todo el sistema. La teoría de restricciones se ha desarrollado desde un método de planeación de manufactura hasta una filosofía de gestión de manufactura, para construir y comunicar soluciones de sentido común a los problemas de los negocios que invariablemente envuelven más de un área funcional. Goldratt reconoce que toda la organización está hecha para un propósito y toda acción tomada por una parte de la organización debe ser juzgada por su impacto en el propósito general (Medina, 2018).

En TOC el concepto de restricción es entendido como el factor que impide a las empresas alcanzar su meta, definiendo como meta la razón para que el sistema exista. Para empresas con ánimo de lucro, la meta será ganar más dinero ahora y en el futuro (López, 2006).

Los cuellos de botella (restricción) son la base para la programación y la planeación de la capacidad del sistema de producción, estos se deben programar a su máxima utilización, mientras que los procesos no cuello de botella se programan para servir al cuello de botella. El objetivo de máxima eficiencia para todas las máquinas no se satisface en la TOC (Romero Rojas, 2019).

La secuencia que describe el TOC para poder determinar la restricción identifica cinco pasos básicos que se describen a continuación en la Figura 1:

TOC está basado en el pensamiento sistémico, el cual indica que el máximo rendimiento de un sistema no se obtiene con el máximo rendimiento individual de los diversos recursos, por lo que solo unos pocos tienen que funcionar al máximo para obtener todo lo esperable del sistema. Entonces, si se conoce la restricción del sistema y puede controlarla, obtiene el control de toda la empresa o línea de producción. El darse cuenta de que una empresa, como todo sistema complejo, tiene una restricción, y esta es la que determina su capacidad de generar

dinero, se vuelve relativamente simple controlar la empresa, tomando en cuenta también que el resto de los recursos deben permitir que la restricción produzca tanto como se desea (Gordon, 2020).

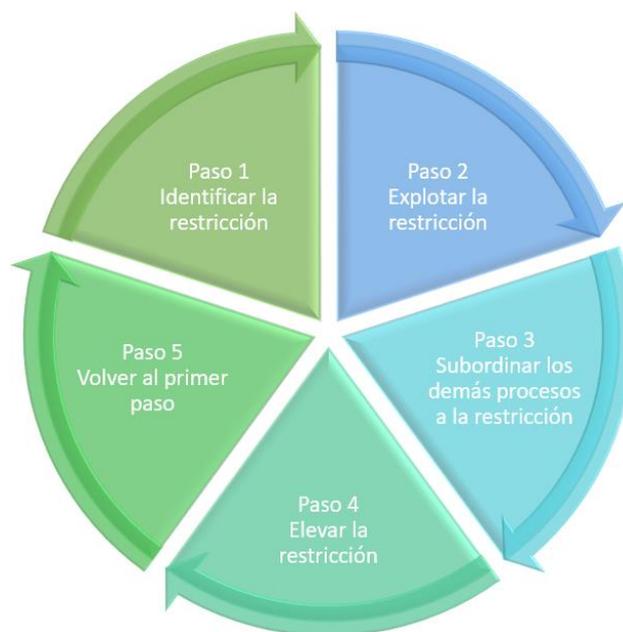


Figura 1: Pasos para aplicar TOC, elaboración propia.

#### ▪ Identificar la restricción

En este paso se tienen que identificar cual es el cuello de botella; el recurso que tiene una capacidad inferior a los demás y es considerada la restricción del sistema (Morales Lodoño, 2016).

Al identificar la restricción o cuello de botella en el sistema, es urgente atacarla, para poder optimizarla, con esto se asegura una vía rápida en pro de la mejora continua cuyo objetivo es obtener resultados favorables en el sistema. Para poder identificar los cuellos de botella se debe determinar la carga de trabajo, establecer los estándares por tareas e identificar los inventarios en procesos (Rubio Tapia, 2021).

#### ▪ Explotar la restricción

En este paso se requiere determinar de qué manera se debe explotar la restricción para maximizar su utilidad y usarlo de la manera más efectiva posible, esto se logra evitando tiempo ocioso, haciendo mantenimientos para evitar averías, producir partes que no serán necesarias, etc. (Morales Lodoño, 2016).

Muchas empresas optan por detener el cuello de botella, siendo un error, lo que se debe hacer es explotarlo con el fin de no detener la producción.

Si el sistema de producción no está en la capacidad de producir todos los productos demandados, se debe seleccionar los productos de mayor rotación. Para poder optimizar el cuello de botella es necesario identificar y eliminar la restricción que puede afectar su desempeño (Rubio Tapia, 2021).

Aprovechar el recurso al máximo, la máquina que mayor restricción tenga deberá trabajar horas extras o ser utilizada en el proceso productivo solo para un producto, capacitar al personal, crear un programa de mantenimiento preventivo, tener un pequeño *Stock* en insumos para que el proceso no se detenga, subcontratar parte del proceso (Rubio Tapia, 2021).

Pueden ser algunas de las estrategias que permitirán explotar como tal la restricción o cuello de botella, de tal forma que se podrá, como así lo muestra TOC, maximizar a un nivel óptimo la restricción.

- Subordinar el resto del sistema a la restricción

En este paso se hace necesario que el nivel de utilización de los recursos no restrictivos, sean determinados por el cuello de botella. Es decir, se deben programar los recursos con base la restricción (Morales Lodoño, 2016).

Cuando ya se tenga definido que hacer con el cuello de botella, se convierte en el ritmo del proceso, garantizando el trabajo continuo en las máquinas sin que se lleguen a tener paros innecesarios.

Una de las instrucciones básicas en este paso es el de abastecer con material los puntos críticos del proceso asegurando que la restricción se mantenga estable, es decir, evitar los impactos generados por falta de material (Rubio Tapia, 2021).

- Elevar la restricción

Este paso lo que busca es tratar de aumentar la capacidad del cuello de botella de manera que permita agregar valor a este. Para lograrlo se puede desplazar partes a otros procesos, aumentar las horas-hombre, aumentar la cantidad de máquinas o subcontratando parte de la producción del cuello de botella (Morales Lodoño, 2016).

Para lograr elevar la restricción y eliminar el cuello de botella, es necesario llevar a cabo un análisis que permita determinar si se tiene que adquirir maquinaria moderna, subcontratar procesos, mejorar métodos, reubicar instalaciones, entre otras actividades que se realicen con el fin de llegar a incrementar la producción en todo el sistema (Rubio Tapia, 2021).

- Volver al primer paso

Trata de haber roto la restricción, se realiza un nuevo ciclo de TOC en el que se debe identificar una nueva restricción; un análisis que permitirán mantener una revisión continua del proceso y de sus restricciones (Morales Lodoño, 2016).

En caso de que la restricción haya sido superada en el punto del proceso inicial que ocasiona el conflicto y se logre incrementar la producción en el sistema, al ser una metodología en la mejora continua, es necesario regresar al primer paso y detectar nuevas restricciones dentro del proceso.

Quedando así establecido un sistema que permitirá evaluar, analizar, eliminar presentes y futuras restricciones (Rubio Tapia, 2021).

### 3.2. Efectividad Global del Equipo (OEE)

En muchas industrias, la efectividad de los equipos de producción es de suma importancia. OEE es el acrónimo para Efectividad Global del Equipo (*Overall Equipment Effectiveness*), está ganando cada vez más interés punto clave de medición de considerable relevancia para la fabricación sostenible.

Hay algunas investigaciones sobre OEE, pero tratan principalmente de los aspectos técnicos como método de medición y por ende existen pocos estudios de casos informados y cuando se incluyen estudios de casos, estos generalmente tienen un papel simplemente de ilustrar un aspecto particular de la medición y definición del OEE (Sohal, Olhager, O'Neill, & Prajogo s.f.).

La OEE muestra el porcentaje de efectividad de una máquina con respecto a su máquina ideal equivalente. La diferencia la constituyen las pérdidas de tiempo, las pérdidas de velocidad y las pérdidas de calidad (Alonzo González, 2009).

El OEE mide la efectividad de las máquinas y líneas a través de un porcentaje, que es calculado combinando disponibilidad, desempeño y calidad asociados a cualquier proceso de producción (Alonzo González, 2009).

De igual manera mide la variación de los impactos en las operaciones programadas para producción con respecto a la eficiencia de mantenimiento (disponibilidad), producción (desempeño) y calidad, además hace una distinción entre estos tres componentes (Sohal, Olhager, O'Neill, & Prajogo D s.f.).

**Disponibilidad:** es el tiempo real de la máquina produciendo

**Desempeño:** es la producción real de la máquina por su tiempo de ciclo en un determinado periodo de tiempo.

**Calidad:** es la producción sin defectos generada.

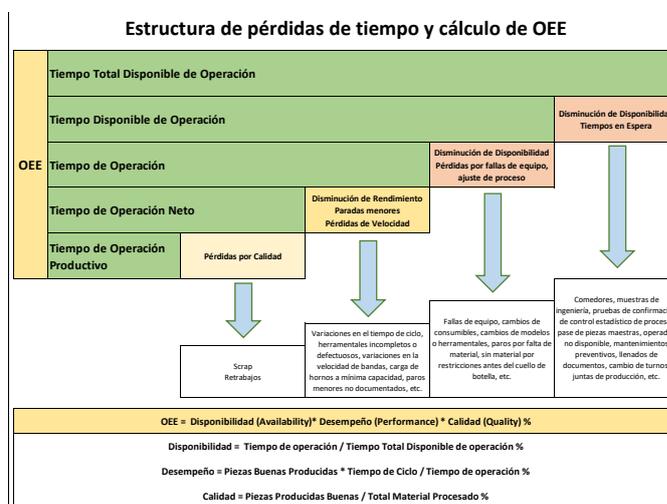


Figura 2: Estructura de pérdidas de tiempo y cálculo de OEE, elaboración propia.

El valor de OEE permite clasificar una o más líneas de producción, o toda una planta, con respecto a las mejores de su clase y que ya han alcanzado el nivel de excelencia, como se muestra en la tabla 2 (Alonzo González, 2009).

Tabla 2: Clasificación de OEE, elaboración propia

OEE	Calificación	Características
<65%	Inaceptable	Importantes pérdidas económicas. Muy baja competitividad
>= 65% < 75%	Regular	Aceptable solo si se está en proceso de mejora. Pérdidas económicas. Baja competitividad
>= 75% < 85%	Aceptable	Ligeras pérdidas económicas. Competitividad ligeramente baja.
>= 85% < 95%	Buena	Entra en valores World Class. Buena competitividad
>= 95%	Excelencia	Valores World Class. Excelente competitividad.

Al mismo tiempo, OEE analiza y califica los diferentes tipos de pérdida que pueden producirse en un proceso productivo clasificándolas en:

#### a) Disminución o Pérdidas de OEE por disponibilidad del equipo

**Pérdidas de Tiempo:** se define como el tiempo durante el cual la máquina debería haber estado produciendo, pero no lo ha estado. Ningún producto sale de la máquina (Casilimas Macias, 2012).

**Pérdidas por Falla de Equipo:** un repentino e inesperado fallo o avería genera una pérdida en el tiempo de producción. La causa de esta disfunción puede ser técnica o de planeación (por ejemplo; error al operar la máquina, mantenimiento pobre en el equipo). El OEE considera este tipo de pérdida a partir del momento en el cual la falla aparece (Casilimas Macias, 2012).

**Esperas:** el tiempo de producción se reduce también cuando la máquina está en espera. La máquina puede quedarse en estado de espera por varios motivos, por ejemplo; debido a un cambio de modelo, por mantenimiento, o por alguna reparación de un herramienta o la comida del operador.

En el caso de un cambio de modelo, la máquina normalmente tiene que apagarse durante algún tiempo, cambiar herramientas o herramientas, u otras partes. La técnica de SMED (*Single Minute Exchange of Die*) define el tiempo de cambio como el tiempo comprendido entre el último producto válido del lote anterior y el primer producto bueno del nuevo lote. Para el OEE, el tiempo de cambio es el tiempo en el cual la máquina no fabrica ningún producto (Casilimas Macias, 2012).

Como se puede observar en la Figura 2 el tiempo total disponible de operación y el tiempo disponible de operación, en términos de pérdidas reflejan los conceptos de tiempos en espera y pérdidas por fallas de equipo o ajustes de proceso (Casilimas Macias, 2012).

#### b) Disminución o Pérdidas de OEE por rendimiento del equipo

**Pérdidas por velocidad:** una pérdida por velocidad implica que la máquina está funcionando, pero no a su velocidad

máxima. Existen dos tipos de pérdidas de velocidad: (Casilimas Macias, 2012).

**Paros Menores o Micro paros:** cuando una máquina tiene interrupciones cortas y no trabaja a velocidad constante, estos paros menores y las consecuentes pérdidas de velocidad son generalmente causadas por pequeños problemas tales como bloqueos producidos por sensores de presencia o atoramientos en las cintas transportadoras o en ocasiones cuando el herramienta no está completo en cantidad. Estos pequeños problemas pueden disminuir de forma drástica la efectividad de la máquina (Casilimas Macias, 2012).

En teoría los paros menores son un tipo de pérdida de tiempo. Sin embargo, al ser tan pequeñas (normalmente menores a 5 minutos) no se registran como una pérdida de tiempo (Casilimas Macias, 2012).

**Pérdida de velocidad o velocidad reducida:** las pérdidas por velocidad o velocidad reducida es la diferencia entre la velocidad fijada en la actualidad y la velocidad teórica o de diseño.

En ocasiones hay una considerable diferencia entre lo que los teólogos consideran que es la velocidad máxima y la velocidad teórica.

En muchos casos, la velocidad de producción se ha rebajado para evitar otras pérdidas tales como defectos de calidad y averías. Las pérdidas derivadas a velocidades reducidas son por tanto en la mayoría de los casos ignoradas o infravaloradas (Casilimas Macias, 2012).

#### c) Disminución o Pérdidas de OEE por calidad de producción en el equipo

La pérdida de calidad ocurre cuando la máquina fabrica productos que no son buenos a la primera. Se pueden diferenciar dos tipos de pérdidas de calidad (Casilimas Macias, 2012).

**Scrap:** son desechos de aquellos productos que no cumplen con los requisitos establecidos por calidad, incluso aquellos que no habiendo cumplidos con las especificaciones inicialmente puedan ser vendidos como productos de menor calidad. El objetivo es “cero defectos”. Fabricar siempre productos de primera calidad desde la primera vez (Casilimas Macias, 2012).

Un tipo específico de pérdida de calidad son las pérdidas derivadas a los arranques de producción. Estas pérdidas ocurren cuando:

- Durante el arranque de la máquina, la producción no es estable inicialmente y los primeros productos no cumplen las especificaciones de calidad.

- Cuando los productos al final de la producción de un lote se vuelven inestables y no cumplen con las especificaciones.

- Aquellos productos que no se consideran como buenos para la orden de fabricación y, consecuentemente, se consideran una pérdida.

Normalmente este tipo de pérdidas se consideran inevitables. Sin embargo, el volumen de estas puede ser sorprendentemente grande (Casilimas Macias, 2012).

**Retrabajo:** los productos retrabajados son también productos que no cumplen los requisitos de calidad desde la primera vez, pero pueden ser reprocesados y convertidos en

productos de buena calidad. A primera vista, los productos retrabajados no parecen ser muy malos, incluso para el operario pueden parecer buenos. Sin embargo, el producto no cumple las especificaciones de calidad a la primera y supone por tanto un tipo de pérdida de calidad (al igual que ocurría con el *scrap*) (Casilimas Macias, 2012).

Las unidades producidas pueden ser: conformes, buenas o no conformes, malas o rechazos. A veces, las unidades no conformes pueden ser reprocesadas y pasar a ser unidades conformes. El OEE solo considera buenas las que salen conformes a la primera vez, no las reprocesadas. Por tanto, las unidades que posteriormente serán reprocesadas deben considerarse rechazos, es decir, malas. Por tanto, la calidad resulta de dividir las piezas buenas entre las producidas por el total de piezas producidas incluyendo piezas retrabajadas (Casilimas Macias, 2012).

#### 4. Mejora Continua en las líneas APT (*Automotive Pressure Transducer*)

En búsqueda de la mejora continua dentro de las líneas APT y atendiendo a las necesidades de cliente, se analizará de manera global el comportamiento en conjunto de las 22 líneas APT las cuales están divididas en dos unidades de negocio *Power Train (PT)* y *Air Acondioned (AC)*.

Cabe destacar que por los procesos tan similares con los que cuenta esta familia de productos APT es posible analizar los procesos en 6 bloques o áreas de producción, las cuales son soldadura (*SOLDER*), ensamble final (*CRIMPER*), calibración del sensor (*CALOT*), pruebas funcionales (*FFT*), pruebas de intrusión de gases (*LEAK TESTER*) y empaque (*PACKING*).

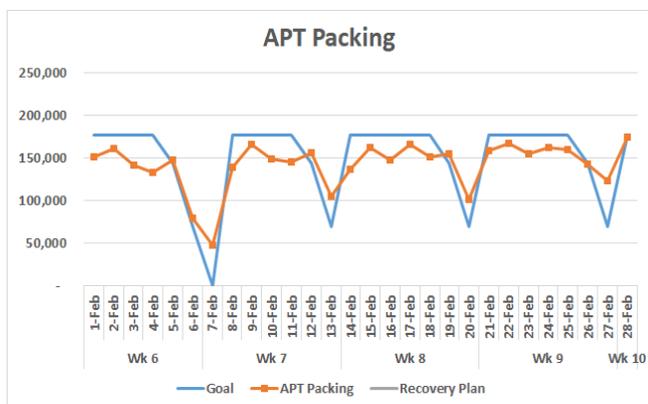


Figura 3: Producción APT PACKING, elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 3, el desempeño general de las líneas de producción no alcanzó su objetivo diario, por lo que es necesario definir que líneas APT son las que están influyendo de manera significativa en el resultado.

##### 4.1. Identificar la restricción

El ciclo de TOC define un proceso continuo de mejora, por lo que para líneas de producción tan demandantes la restricción puede moverse en cuestión de días e inclusive horas.

Por definición y constitución de las líneas de APT la operación *CALOT* es el cuello de botella respectivamente ya que son las operaciones que tienen un mayor tiempo de ciclo con respecto a las demás operaciones.

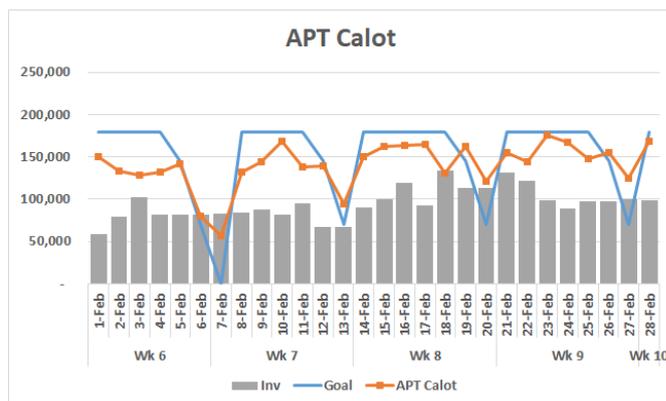


Figura 4: Producción APT CALOT, elaboración propia.

Mediante la segmentación de familia de productos para las líneas de APT se realiza el siguiente análisis por unidad de negocio. Un punto importante en las Figuras 4, 5 y 6 es que las barras grises representan el inventario disponible para asegurar el desempeño de los cuellos de botella.

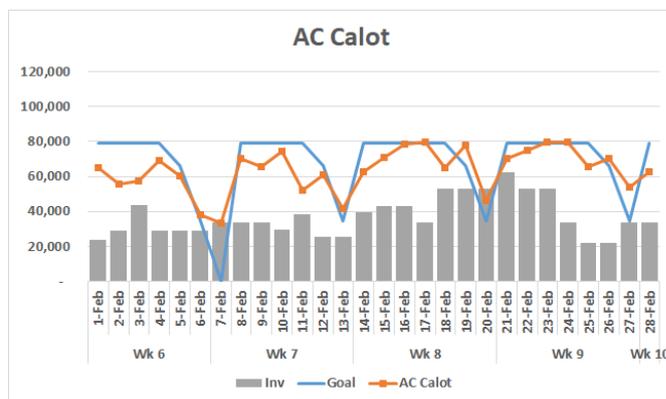


Figura 5: Producción AC CALOT, elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 5 ya durante la semana 9 y semana 10 del mes las operaciones *CALOT* de la unidad de negocio *AC* mostraron una consistencia contra la meta fijada para el mes.

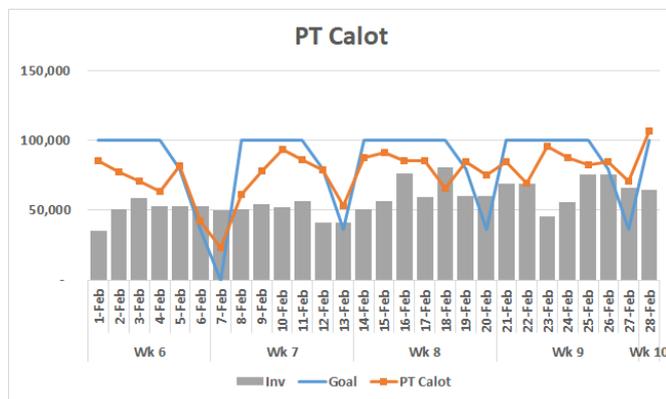


Figura 6: Producción PT CALOT, elaboración propia.

Si se realiza una comparación inicial entre la Figura 4, 5 y 6, en sus correspondientes de las líneas naranjas que representan el valor actual de desempeño de las calibradoras, se puede visualizar lo siguiente:

Al comparar la Figura 4 y la Figura 5, se puede observar que el comportamiento de producción de las líneas naranjas muestra una tendencia similar a lo largo de las semanas.

En contraste, al realizar la misma comparación entre la Figura 4 y la Figura 6, se evidencia una diferencia en la tendencia de producción. Además, en la Figura 6 se observa que durante las semanas wk 6, wk 7, wk 8 y wk 9 del mes no se logró alcanzar el objetivo establecido. Esto indica que una o varias líneas en PT están teniendo un impacto significativo en la producción global

Tabla 3: Productividad mensual de CALOT, elaboración propia

CELL	Total Production	Total Production Plan	Delta	% Linearity	Productivity
06M	196,943	261,703	(64,760)	75%	-2.8%
08M	100,815	51,550	49,265	196%	2.1%
11M	100,682	69,951	30,731	144%	1.3%
12M	217,601	243,112	(25,511)	90%	-1.1%
14M	239,321	304,731	(65,410)	79%	-2.8%
15M	194,371	259,615	(65,244)	75%	-2.8%
19M	167,730	216,377	(48,647)	78%	-2.1%
16M	171,680	189,277	(17,597)	91%	-0.8%
17M	247,076	244,053	3,023	101%	0.1%
18M	214,532	286,811	(72,279)	75%	-3.1%
21M	214,113	206,476	7,637	104%	0.3%

Como parte de la definición de la restricción se puede observar en la tabla 3, la producción total diferenciada contra el plan de producción total en la columna delta, la cual en color rojo nos muestra el total de piezas no producidas por cada celda, y en la columna % LINEARITY nos refleja la relación entre el TOTAL PRODUCTION entre TOTAL PRODUCTION PLAN, esto para tener una visión de cuán lejos se encuentra contra lo planeado.

Ahora la columna de PRODUCTIVITY es un punto de referencia importante que permite visualizar el efecto del DELTA entre la suma de todas las líneas de producción de la columna TOTAL PRODUCTION PLAN.

En la tabla 3, las celdas que están influyendo en la baja productividad de la unidad de negocio PT son: C18M, C15M, C14M, C06M esto al considerar su impacto en productividad.

Ahora previniendo y manteniendo el concepto de dinamismo para esta metodología, se define el objetivo para la unidad de negocio en las semanas subsiguientes.

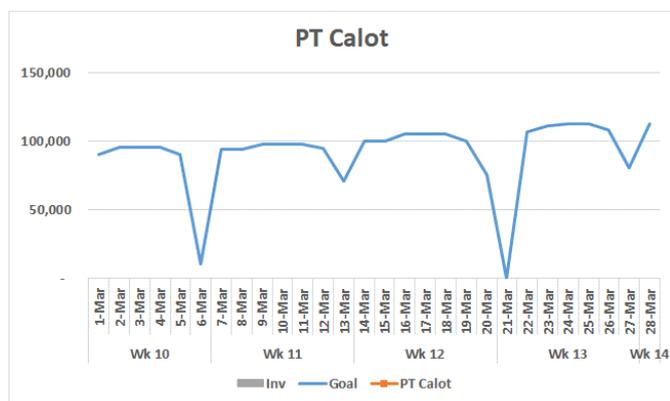


Figura 7: Producción PT CALOT, elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 7, la condición de producción indica un incremento gradual semana con semana, lo cual indica que se estará utilizando más capacidad disponible para cubrir los requerimientos de cliente, por lo que realizar revisiones diarias en piso y generar un plan de acción de mejora continua ayudará a alcanza estos objetivos diarios de producción.

#### 4.2. Explotar la restricción

Una vez definidas las restricciones por línea, se llevará a cabo un análisis para observar el comportamiento en términos de piezas producidas por hora (PPH). Durante el periodo comprendido entre el 9 de febrero y el 28 de febrero, se realizaron registros de producción por hora.

Se definieron las siguientes categorías de análisis de tal forma que permitan generar acciones concretas para explotar la restricción.

**END OF SHIFT** (Cambio de turno), periodo en el cual se cierran las operaciones por parte del operador y llena la documentación necesaria para mantener la integridad del producto.

**LUNCH** (Comedor), periodo de tiempo en el cual el operador toma sus alimentos.

**NORMAL PRODUCTION**, periodo de tiempo en el cual la máquina no presenta fallas de equipo.

**RUN TEST**: ejercicio de análisis de un periodo de 1 hora de producción en las que se analiza por observación la operación en periodos de 10 minutos buscando situaciones en las cuales el operador pueda tener perdidas de rendimiento relacionadas con paros menores o micro paros y perdidas por velocidad.

De igual manera este formato permite identificar más áreas de oportunidad, que en su momento se analizaran ya que al ser un ejercicio en donde la observación e identificación de problemas da mayores resultados.

RUN TEST						
OPERACIÓN: CALOT 21M				CELDA: 21M	Fecha: 12-Febrero	
HORA DE INICIO: 10:00 a.m				MODELO: 8ZCP50-01	4.45	15,533
# ITERACIONES	PIEZAS BUENAS	PIEZAS MALAS	PZS. RETRABAJADAS	HALLAZGO/OBSERVACIONES	CT	CAPACITY @80 OEE
1ra = 10 MIN	134	-	-	Operador en proceso de certificación Cambio de charola	4.48	15,437
2da = 10 MIN	106	4	-	Operador en proceso de certificación Cambio de charola La pieza no puede ser colocada en el pallet Piezas fuera de especificación	5.66	12,211
3ra = 10 MIN	116	2	-	Operador en proceso de certificación Cambio de charola Piezas fuera de especificación	5.17	13,363
4ta = 10 MIN	112	1	-	Operador en proceso de certificación Cambio de charola La pieza no puede ser colocada en el pallet Piezas fuera de especificación	5.36	12,902
5ta = 10 MIN	110	-	-	Operador en proceso de certificación Cambio de charola La pieza no puede ser colocada en el pallet	5.45	12,672
6ta = 10 MIN	112	-	-	Operador en proceso de certificación Cambio de charola La pieza no puede ser colocada en el pallet	5.36	12,902
<b>TOTAL</b>	<b>690</b>	<b>7</b>	<b>-</b>		<b>5.22</b>	<b>13,248</b>
Yield			<b>99.0%</b>			

Figura 8: RUN TEST, elaboración propia.

Se puede notar en la Figura 8, que existe personal en proceso de certificación que disminuye el desempeño del proceso.

Se observa de igual manera que el traslado de charolas para continuar con la siguiente operación disminuye la productividad de las operaciones de CALOT.

Un punto importante que concierne a la porción de herramientas o herramientas es que los pallets o los nidos de transporte de materia prima dentro de la operación CALOT muestran un deterioro consistente ya que no permiten la inserción del sensor APT.

Los datos recolectados se analizaron con MINITAB obteniendo la siguiente gráfica de resultados.

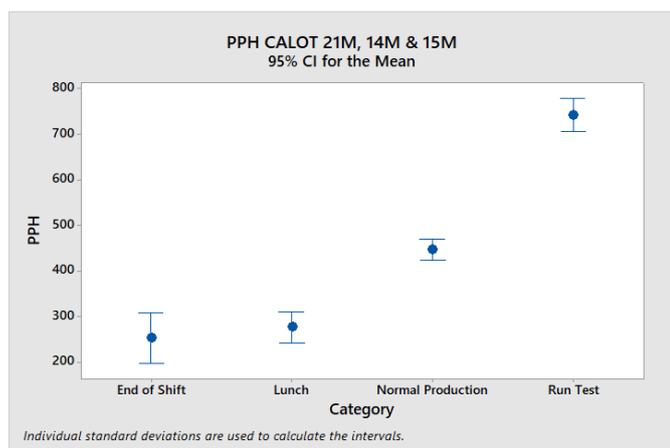


Figura 9: PPH CALOT 21, 14M & 15M, elaboración propia.

En la Figura 9 es evidente que durante la categoría *END OF SHIFT*, la media se mantiene dentro de las 253 PPH con un 95% de confiabilidad, y de igual forma se observa que el rango oscila entre los 197 PPH y 308PPH, lo cual evidentemente muestra una baja productividad.

Durante la categoría *LUNCH*, la media se mantiene 276 PPH con una confiabilidad del 95%, que de igual manera muestra una baja productividad.

De igual forma en la categoría *NORMAL PRODUCTION* la media es de 446 PPH con una confiabilidad del 95%, que en términos generales para estos equipos es una baja productividad.

En la categoría *RUN TEST* se muestra que la media 741 PPH, con un intervalo de 704 PPH a 778 PPH, lo cual nos muestra que el equipo tiene capacidad para cumplir requerimientos de productividad con un 95% de confiabilidad.

Conforme al método TOC se definirá como explotar la restricción mediante las siguientes instrucciones:

- El supervisor en turno deberá asegurar tener un operador entrenado adicional al titular de tal manera que pueda asegurar que al cambio de turno y durante el periodo de alimentos la operación pueda ser cubierta y poder al menos llegar al promedio de producción de 446 PPH.
- Definir junto con el departamento de capacitación la criticidad de la certificación y valoración del operador en proceso de entramiento de tal manera que se asegure un pronto incremento de productividad por parte del operador.
- Dado que las operaciones subsecuentes a la operación de calibración tienen un mejor tiempo de ciclo, la tarea de

cambio de charolas puede ser absorbida por el operador de la siguiente operación a CALOT.

- Hay que asegurar que los herramientas que vienen del área de herramientas estén en correctas condiciones que aseguren la correcta inserción del sensor APT para su proceso de calibración.
- Continuar con los estudios de *RUN TEST*, ya que estos ofrecen una mejor visibilidad con respecto a lo que ocurre en la operación.

### 4.3. Subordinar la restricción

Bajo el supuesto en el que la restricción inicie la mejora continua como resultado inmediato, será un mayor consumo de materia prima o mejor dicho una mayor demanda de la operación anterior inmediata. En las tablas 4, 5 y 6 se encuentran los datos estadísticos de las condiciones de producción en las que se encuentran las operaciones de *SOLDER* y *CRIMPER* y CALOT de las celdas que se están estudiando.

Tabla 4: Productividad mensual de CALOT, elaboración propia

CELL	Total Production	Total Production Plan	Delta	% Linearity	Productivity
14M	239,321	304,731	(65,410)	79%	-2.80%
15M	194,371	259,615	(65,244)	75%	-2.80%
18M	214,532	286,811	(72,279)	75%	-3.10%

Tabla 5: Productividad mensual de CRIMPER, elaboración propia

CELL	Total Production	Total Production Plan	Delta	% Linearity	Productivity
14M	268,728	304,731	(36,003)	88%	-1.54%
15M	201,664	259,615	(57,951)	78%	-2.48%
18M	239,667	286,811	(47,144)	84%	-2.02%

Tabla 6: Productividad mensual de SOLDER, elaboración propia

CELL	Total Production	Total Production Plan	Delta	% Linearity	Productivity
14M	252,946	304,731	(51,785)	83%	-2.22%
15M	205,309	259,615	(54,306)	79%	-2.33%
18M	227,215	286,811	(59,597)	79%	-2.55%

Al observar el comportamiento de producción para las operaciones de *SOLDER* y *CRIMPER* aparentemente estas están subordinadas al desempeño del cuello de botella natural de las líneas APT CALOT, sin embargo y con el fin de no solo suponer se realizará un estudio de estas operaciones para confirmar la capacidad que tienen de respuesta ante el requerimiento a futuro de la operación de CALOT y que no sean una posterior restricción hacia la mejora continua.

Para llevar a cabo el estudio, es necesario tener en cuenta la información proporcionada en la Figura 9, donde se utilizará el tiempo promedio del *RUN TEST* como la velocidad de producción óptima., en vísperas de llegar a ese nivel de producción por hora para poder asegurar un flujo continuo y sin interrupciones hacia el cuello de botella, es decir 741 PPH.

Tabla 7: Tiempo de ciclo, PPH y capacidad de respuesta para las operaciones SOLDER, CRIMPER y CALOT, elaboración propia

Cells	Cycle Time		PPH				Capacidad de Respuesta	
	SOLDER	CRIMPER	CALOT	SOLDER	CRIMPER	CALOT	SOLDER	CRIMPER
14M	4.37	4.28	4.86	824	841	741	10%	12%
15M	4.32	3.21	4.86	833	1,121	741	11%	34%
18M	3.93	4.05	4.86	916	889	741	19%	17%
Media	4.21	3.85	4.86	858	951	741	14%	22%

La tabla 7 muestra el estudio de tiempos ciclo de las celdas 14M, 15M y 18M, donde es evidente lo siguiente:

**SOLDER**, de manera general el tiempo de ciclo promedio en las 3 celdas de producción muestra un promedio general de 4.21 segundos por pieza, es decir estas operaciones pueden mantener una velocidad de producción de 858 PPH. Por lo que se observa que la capacidad de respuesta es de un 14% mejor que el cuello de botella.

**CRIMPER**, de manera general el tiempo de ciclo general promedio es de 3.58 segundos por pieza, es decir, estas operaciones pueden mantener una velocidad de producción de 951 PPH, por lo tanto, la capacidad de respuesta es de un 22% mejor que el cuello de botella.

Conforme al método TOC se definirá como subordinar la restricción mediante las siguientes instrucciones:

- **SOLDER**, iniciar una revisión de tiempos de ciclo para poder igualar el mejor tiempo de ciclo que presenta la **SOLDER** de celda 18M.
- Hay que asegurar que las operaciones de **SOLDER** y **CRIMPER** logren gradualmente igualar la velocidad o PPH a la par que incremente su productividad **CALOT** y de esta manera abastecer de material oportunamente al cuello de botella.

#### 4.4. Elevar la restricción

Para elevar la restricción acorde con TOC, se realizó un análisis a través de OEE, la tabla 8 muestra los siguientes resultados:

**Disponibilidad:** El promedio general de 4 semanas es de 83.3% para 3 equipos, mostrando así un alto nivel de oportunidad de mejora de casi un 10%.

**Desempeño:** Se observa una irregularidad, ya que no se logra una consistencia a pesar de tener un promedio general del 90.9%. Sin embargo, se evidencia una mejora de al menos un 5%.

**Calidad:** En este caso el promedio general en términos de calidad de producto es del 98.1%.

Tabla 8: OEE Semanal CALOT, elaboración propia

Wk	Cells	Disponibilidad	Desempeño	Calidad	OEE	Calificación
Wk 6	14M	75.3%	97.2%	97.7%	71.5%	Regular
	15M	89.9%	87.0%	98.7%	77.2%	Regular
	18M	75.0%	91.5%	98.0%	67.3%	Regular
Wk 7	14M	82.0%	93.9%	97.7%	75.2%	Regular
	15M	78.7%	94.3%	98.7%	73.2%	Regular
	18M	83.3%	95.7%	98.0%	78.2%	Regular
Wk 8	14M	84.7%	85.4%	97.7%	70.6%	Regular
	15M	88.6%	83.7%	98.7%	73.2%	Regular
	18M	87.6%	80.8%	98.0%	69.4%	Regular
Wk 9	14M	82.5%	97.8%	97.7%	78.8%	Aceptable
	15M	83.9%	91.6%	98.7%	75.8%	Aceptable
	18M	87.9%	91.6%	98.0%	78.9%	Aceptable
	Promedio	83.3%	90.9%	98.1%	74.1%	Aceptable

Conforme al método TOC se definirá como elevar la restricción mediante las siguientes instrucciones:

- Se sugiere realizar un Pareto de fallas para definir que modos de falla están consumiendo ese 10% de disponibilidad en los equipos CALOT como se muestra en la Figura 10.

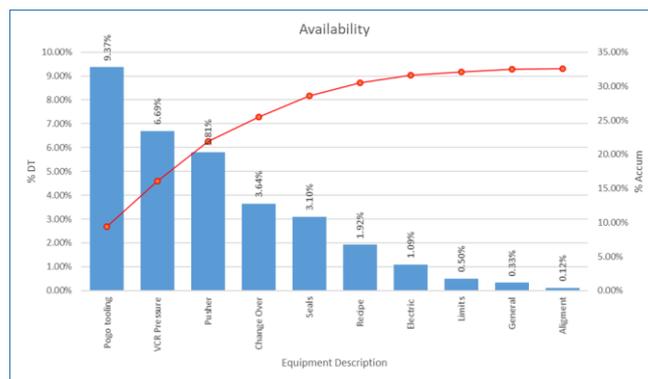


Figura 10: Pareto de modos de falla de equipo 18M, elaboración propia.

- La disponibilidad y los cambios de modelo también desempeñan un papel crucial. En la Figura 11, se muestra un ejemplo del cronograma de actividades para el cambio de modelo. Este cronograma permite controlar las actividades realizadas por el operador, registrar el tiempo real durante el cambio de modelo y detectar aquellas actividades que no cumplen con el tiempo programado. De esta manera, se puede tomar medidas correctivas para volver al estándar del cambio de modelo.

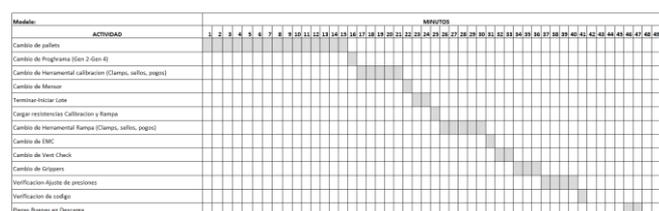


Figura 11: Cronograma de actividades para cambio de modelo en la operación de CALOT, elaboración propia.

- Un modo de falla común a observar es cuando en el cambio de modelo los herramientas fallan originando problemas eléctricos, o incluso de comunicación entre la máquina y el sensor APT, por lo que lo que se sugiere realizar mantenimientos rutinarios preventivos a estos herramientas.
- Otro factor importante para controlar y vigilar en los cambios de modelos es la cantidad de cambios de modelo por semana y estos deben de vigilarse en la programación o plan de producción semanal por parte de planeación.
- En términos de tiempo de ciclo se sugiere que se realice un perfil de tiempos y movimientos de los mecanismos, cilindros, tiempos de apertura y cierre de dispositivos neumáticos de tal manera que todos los procesos electromecánicos neumáticos de la máquina estén en una óptima secuenciación de pasos.
- Otro punto importante que considerar es que el tiempo de ciclo puede tener pérdidas debido al uso de software para controlar los procesos, en este caso para las CALOT se controlan mediante programas personalizados para realizar la calibración de los

sensores APT, en los cuales los perfiles de presión pueden influir en el tiempo de ciclo.

#### 4.5. Volver al primer paso

En este caso de estudio, la siguiente iteración se realizará de la misma manera, buscando mejorar el nivel de productividad por cada una de las celdas de producción, maximizando la salida de producción en relación con la variación negativa de productividad que nos servirá de referencia para iniciar un nuevo ciclo de mejora continua con TOC.

En varios casos es factible que las acciones puedan aplicar de la misma manera en todas las demás celdas de producción ya que son muy similares los procesos, y de manera general las CALOT son técnicamente iguales o en otros casos semejantes.

### 5. Conclusiones

Para la mejora de la producción se implementó la metodología TOC y la medición del OEE se obtuvieron los siguientes resultados:

**Identificación de la restricción:** La operación CALOT en las unidades de negocio Power Train (PT) y Air Acondicionado (AC) se identificó como la restricción o cuello de botella en el proceso de producción de las líneas APT. Esta operación tiene un mayor tiempo de ciclo en comparación con otras operaciones.

**Análisis de desempeño:** Se realizó un análisis del desempeño de las líneas de producción y se identificaron las líneas específicas que estaban impactando negativamente en la producción global. En la unidad de negocio PT, se identificaron las líneas C18M, C15M, C14M y C06M como las que estaban afectando la productividad.

Para explotar la restricción, se recomendó tener un operador adicional para cubrir el cambio de turno y de alimentos, acelerar la certificación de los operadores en proceso de entrenamiento y optimizar el proceso de cambio de charolas en la operación CALOT.

Para subordinar la restricción, se sugirió mejorar la velocidad de producción de las operaciones SOLDER y CRIMPER para abastecer de manera oportuna a CALOT.

**Análisis de OEE:** Se realizó un análisis de OEE (Overall Equipment Efficiency) para identificar oportunidades de mejora en términos de disponibilidad, desempeño y calidad. Se encontró un alto potencial de mejora en la disponibilidad de los equipos CALOT, mientras que el desempeño y la calidad se mantuvieron en niveles aceptables.

**Acciones para elevar la restricción:** Se propusieron acciones específicas para elevar la restricción identificada a

través del análisis de OEE. Estas acciones incluyeron realizar un Pareto de fallas para identificar los principales problemas en la disponibilidad de los equipos CALOT, gestionar de manera efectiva los cambios de modelo, realizar mantenimientos preventivos a los herramientas, optimizar los tiempos y movimientos de los mecanismos, y revisar los perfiles de presión en los programas de calibración.

**Iteración y mejora continua:** Se destacó la importancia de aplicar las acciones de mejora de manera general en todas las celdas, ya que los procesos son similares y las operaciones CALOT son técnicamente iguales o similares.

La implementación de la metodología de la Teoría de Restricciones (TOC) y la medición del Overall Equipment Efficiency (OEE) demostraron ser herramientas clave para identificar y resolver limitaciones en la producción, logrando mejorar la eficiencia, optimizar los recursos y promover la mejora continua en el proceso productivo.

### Referencias

- Alonzo González, L. A. (2009). Una Herramienta de Mejora, El OEE (Efectividad Global del Equipo). Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya, 11.
- Carbajal Suarez, Y. (19 de febrero de 2016). La manufactura y la industria automotriz en cuatro regiones de México. Un análisis de su dinámica de crecimiento, 1980-2014. *SciELO Analytics*, pág. 30.
- Casilimas Macias, C. (2012). Implementación del sistema de indicadores de productividad y mejoramiento OEE (Overall Effectiveness Equipment) en la línea tubería en corpacero s.a. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 81.
- Dolgui, A. (2017). Some new ideas for assembly line balancing research. *IFAC (International Federation of Automatic Control)*, 1-5.
- Goldratt, E. M., & Cox, J. (1988). *La Meta: Un proceso de mejora continua*.
- Gordon, X. M. (2020). Análisis de la aplicación de la Teoría de Restricciones (TOC) en la industria como un sistema de mejoramiento continuo. Universidad Andina Simón Bolívar, 106.
- López García, J. (18 de diciembre de 2017). Las políticas públicas del desarrollo industrial de Aguascalientes, México (1980-2014). *Revista de Economía*
- López, I. D. (2006). Aplicación de la Teoría de Restricciones (TOC) a la gestión de facturación de las empresas sociales del Estado, ESE. *Innovar*, 10
- Mateus, H. O. (2016). Modelo de Optimización en Producción Basado en la Teoría de las Restricciones como Estrategia para la Gestión de la Productividad. Cartagena: Universidad Tecnológica de Bolívar.
- Medina, F. W. (2018). Propuesta de mejora del proceso de producción de paneles publicitarios externos mediante la aplicación de la teoría de restricciones. Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).
- Morales Lodoño, N. (2016). Modelo de Optimización en Producción basado en la Teoría de las Restricciones como Estrategia para la Gestión de la Productividad. Universidad Tecnológica de Bolívar, 168.
- Romero Rojas, J. D. (2019). La Teoría de Restricciones y la Optimización como Herramientas Gerenciales para la Programación de la Producción. Una Aplicación en la Industria de Muebles. *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa*, 17.
- Rubio Tapia, X. E. (2021). Teoría de Restricciones en el área de producción en industrias textiles para el incremento de la productividad. Universidad Técnica de Ambato, 116.
- Sohal, A., Olhager, J., O'Neill, P., & Prajogo, D. (s.f.). *Implementation of OEE - Issues and challenges*. Monash University, 8.
- Vanegas, Y. L. (2012). Aplicación de la Teoría de Restricciones en la Gestión de la Seguridad del Paciente. Facultad de Administración del Rosario, 82